

PEMODELAN TERMOHIDROLIKA SUB-KANAL ELEMEN BAKAR AP-1000 MENGGUNAKAN RELAP5

Suroso⁽¹⁾ dan Sukmanto Dibyo⁽¹⁾

Pusat Teknologi Rekayasa dan Keselamatan Nuklir (PTRKN)- BATAN

Kawasan Puspiptek Gedung 80, Serpong, Tangerang 15314

Email : suroso@batan.go.id

(Naskah diterima : 27-8-2010, disetujui : 24-9-2010)

ABSTRAK

PEMODELAN TERMOHIDROLIKA SUB-KANAL ELEMEN BAKAR AP-1000 MENGGUNAKAN RELAP 5. Investigasi terhadap karakteristik termohidrolika elemen bakar merupakan langkah penting berkaitan dengan aspek desain teras reaktor. Makalah ini menganalisis termohidrolika sub-kanal elemen bakar AP-1000 menggunakan paket RELAP5. Pendekatan model sub-kanal lazim dipakai dalam analisis termohidrolika elemen bakar. Paket program RELAP5 dapat menganalisis karakteristik termohidrolika teras dan sistem reaktor yang dalam analisis sub-kanal ini menggunakan nodalisasi yang terdiri dari model pipa, *time dependent junction*, *time dependent volume* dan struktur kalor. Untuk itu, data desain yang terkait dengan parameter termohidrolika dan data geometri sub-kanal dipakai sebagai acuan. Investigasi kondisi *steady* dilakukan untuk menganalisis data termohidrolika sub-kanal elemen bakar dan simulasi *transient* untuk mengetahui awal pembangkitan fraksi *void* dengan cara pengurangan laju aliran pendingin. Hasil analisis meliputi distribusi temperatur aksial kelongsong, temperatur pendingin, *heat flux* dan fraksi *void*. Pada kondisi *steady*, model ini diverifikasi dengan data parameter desain termohidrolika AP-1000 yang mana secara umum telah menunjukkan kesesuaian. Hasil simulasi yang dilakukan dengan pengurangan laju alir menunjukkan bahwa fraksi *void* terbentuk setelah laju alir turun menjadi 0,1230 kg/s. Hal ini penting untuk dikaji karena berkaitan dengan kondisi kritis teras reaktor.

Kata kunci: pemodelan sub-kanal, elemen bakar AP-1000, dan RELAP5.

ABSTRACT

SUB-CHANNEL THERMAL-HYDRAULIC MODELING OF AP-1000 FUEL ELEMENT USING RELAP 5. Investigation of fuel element thermal-hydraulic characteristic is important step related to aspect of reactor core design. This paper analysis the AP-1000 fuel element sub-channel thermal-hydraulic using RELAP5 code. The sub-channel model approach is usual in the fuel element thermal-hydraulic analysis. The RELAP5 code is capable to analyze the core and reactor system thermal-hydraulic, that used the nodalization, consists of pipe model, *time dependent junction*, *time dependent volume* and heat structure. Therefore, data of design include thermal-hydraulic parameter and sub-channel geometry is applied as a references. The analysis is carried out in case of *steady-state* and *transient* simulation for the cost down flow of coolant. The *steady state* investigation is used to analyze the sub-channel thermal-hydraulic of fuel and *transient* simulation to know beginning of void fraction respectively appear by decreasing of coolant flow rate. The analysis result including of distribution temperature of axial cladding, cooling temperature, *heat flux* and void

fractions. The model of steady-state was verified with the parameter of AP-1000 thermal-hydraulic design in which shows a good agreement. Simulation results carried out by reducing the flow rate shows that the voids fraction formed after the flow rate fell to 0.1230 kg/s. It is important for assessment in the future because it is relate to the critical condition of the reactor core.

Keywords: Sub-channel modeling, fuel element of AP-1000, and RELAP5.

PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) jenis *Pressurized Water Reactor* (PWR) di dunia paling banyak digunakan dibandingkan jenis-jenis lain, baik yang telah beroperasi, dalam pembangunan maupun masih dalam perencanaan. Pembangkitan kalor pada PLTN terjadi di teras reaktor oleh reaksi fisi nuklir, kemudian kalor dipindahkan ke pendingin yang kemudian digunakan untuk membangkitkan uap di pembangkit uap. Uap yang terbentuk digunakan untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik^[1].

Teras reaktor merupakan komponen penting dari suatu instalasi reaktor karena awal pembangkitan energi terjadi di teras dan salah satu cara yang paling ekonomis, mudah dan aman untuk mengevaluasi desain teras PWR adalah perhitungan dengan menggunakan paket program komputer RELAP5. Paket program ini dapat digunakan untuk melakukan analisis termohidrolika teras reaktor PWR dan sangat penting sebagai perangkat lunak untuk mengetahui karakteristik termohidrolika teras dan sistem reaktor^[2].

Persamaan paket program membutuhkan pemodelan yang memerlukan menekankan verifikasi dengan data acuan sehingga keberlakuan model yang dibuat dapat dikonfirmasi. Oleh karena itu dalam analisis ini dititik-beratkan pada investigasi desain termohidrolika elemen bakar AP-1000 antara model dan data acuan untuk parameter laju aliran pendingin, temperatur pendingin dan temperatur kelongsong. Pada pemodelan sub-kanal elemen bakar AP-1000 ini, dilengkapi dengan model *volume*, *junction*, *heat structure* dan *time dependent*

junction yang menggunakan nodalisasi untai terbuka dan dilengkapi dengan kondisi batas sebagai *time-dependent volume (tmdpvol)*^[3]. Sub-kanal (*sub-assembly*) merupakan model pendekatan yang dapat merepresentasikan kondisi termohidrolika desain teras reaktor^[4]. Pendekatan model sub-kanal, lazim dipakai sebagai pemahaman dasar dalam analisis termohidrolika elemen bakar. Hasil model termohidrolika sub-kanal ini adalah berupa pemodelan dan hasil verifikasi data sub-kanal desain termohidrolika elemen bakar AP-1000 yang sekaligus untuk keberlakuan model yang dibuat dengan menggunakan program RELAP 5.

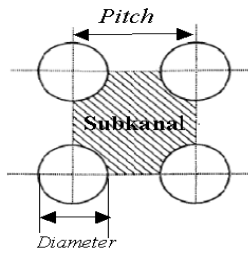
Diharapkan dari hasil analisis ini dapat digunakan untuk melakukan *review* terhadap desain termohidrolika elemen bakar teras AP-1000 disamping itu tentu saja dapat meningkatkan pemahaman dan kemampuan sumber daya manusia (SDM) Indonesia untuk menguasai teknologi reaktor dan mampu berperan sebagai *Technical Support Organization* (TSO) dalam mendukung beroperasinya PLTN di Indonesia.

TEORI

1. MODEL SUBKANAL

Analisis sub-kanal adalah suatu metode yang dapat dipakai dalam menyelesaikan persoalan untuk aliran di dalam banyak kanal yang terhubung secara kontinyu di sepanjang kanal di mana perangkat elemen bakar dibagi dalam beberapa volume pada PLTN jenis PWR, aliran pendingin di dalam teras reaktor merupakan aliran satu fase, oleh karena itu dipergunakan pendekatan volume sub-kanal

pendingin sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Model sub-kanal

Dalam pendekatan volume sub-kanal terdapat beberapa penyederhanaan, antara lain karakteristik sub-kanal seperti kecepatan dan densitas ke arah aksial diwakili oleh satu harga rerata. Selain persamaan kekekalan massa, energi dan momentum, maka persamaan konstitutif juga digunakan dalam penyelesaian model sub-kanal pada RELAP5. Persamaan umum yang penting dalam hal ini adalah^[5],

Persamaan distribusi aksial fluks neutron sepanjang elemen bakar :

$$\phi(z) = \phi_c \cos \frac{\pi z}{H_e} \quad (1)$$

Kalor volumetrik sebanding dengan fluks neutron,

$$q'''(z) = q_c'''(z) \cos \frac{\pi z}{H_e} \quad (2)$$

di mana q''' dan q_c''' adalah kalor volumetrik di titik z di tengah elemen bakar, H_e adalah tinggi ekstrapolasi.

Dari neraca kalor unsur dz pada titik z dan tidak terjadi perubahan fasa, maka kenaikan kalor pada pendingin sama dengan kalor pembangkitan unsur dz kondisi *steady*, sehingga :

$$m c_p dt_f = q''' A_c dz \quad (3)$$

di mana,

m : laju alir pendingin

c_p : kalor jenis pendingin

dt_f : kenaikan temperatur pendingin antara z dan $z+dz$

A_c : luas penampang temperatur elemen bahan bakar. Apabila persamaan-persamaan tersebut diselesaikan maka diperoleh,

$$t_{f2} = t_{f1} + \frac{q_c''' A_c H_e}{\pi c_p m} \quad (4)$$

di mana,

t_{f2} : tempertaur pendingin keluar teras

t_{f1} : temperatur pendingin masuk teras

2. RELAP5

Paket program RELAP5 merupakan program komputer yang telah digunakan secara luas di seluruh dunia untuk melakukan analisis kondisi *steady* maupun transien pada suatu sistem termal dan hidrodinamika pendingin air ringan pada reaktor nuklir maupun non-nuklir.

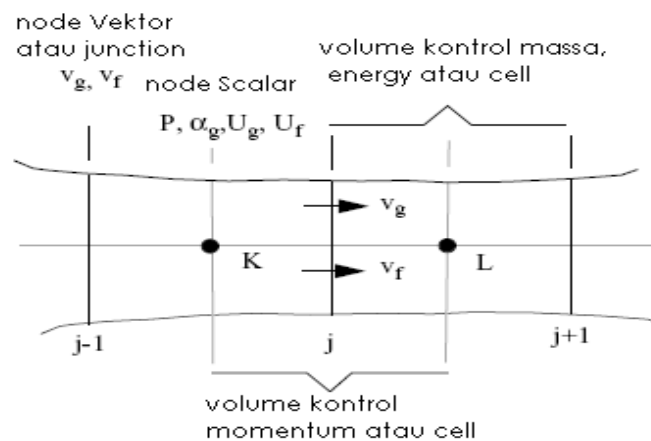
Paket program ini dikembangkan dari model node dan *junction* multi-dimensional termohidrolika untuk menghitung watak keseluruhan termohidrolika sistem pendingin. Generasi fasa uap dalam perhitungan adalah hasil kondisi pada penguapan maupun kondensasi. Model yang digunakan merupakan sistem hidrodinamika non-equilibrium dan *non-homogeneous* dua-fluida termasuk perpindahan gas-gas tak terkondensasi, perpindahan kalor konvektif, konduksi kalor satu dimensi pada struktur sistem, kinetika reaktor, sistem kontrol dan logika trip. Paket program juga mengandung model komponen sistem yang ada pada reaktor pendingin air ringan (*Light Water Reactor*, LWR) seperti pompa, katup, separator dan sebagainya.

Komponen hidrodinamika dapat memodelkan *single volumes*, *time-dependent volumes*, pipa, anulus, separator, percabangan, akumulator dan pompa. Setiap

model saling terhubung dengan model *junction* baik berupa *time-dependent junction*, *single/multiple junction* atau katup. Struktur kalor terdapat pada komponen pembangkit kalor maupun pada bagian yang terjadi perpindahan kalor yang dihubungkan dengan komponen hidrodinamika. Struktur kalor juga dapat mewakili struktur yang melingkupi suatu kanal aliran dan pada reaktor dapat digunakan untuk memodelkan dinding bejana reaktor, *rod* bahan bakar, dan *U-tubes* dari pembangkit uap. Data kinetika reaktor digunakan untuk mewakili perilaku daya

reaktor berdasarkan pendekatan kinetika titik^[6].

Komponen hidrodinamika memiliki korelasi persamaan satu dimensi untuk fluida tunggal maupun aliran dua fasa air dan uap di mana persamaan dasarnya terdiri dari persamaan kekekalan massa, momentum dan energi. Model kesetimbangan dua fasa, diselesaikan secara numerik dalam persamaan implisit. Gambar 2. menunjukkan kecepatan pada batas (*boundary*) yang didefinisikan dengan menggunakan *momentum control volumes* di antara batas volume kontrol massa dan energi.

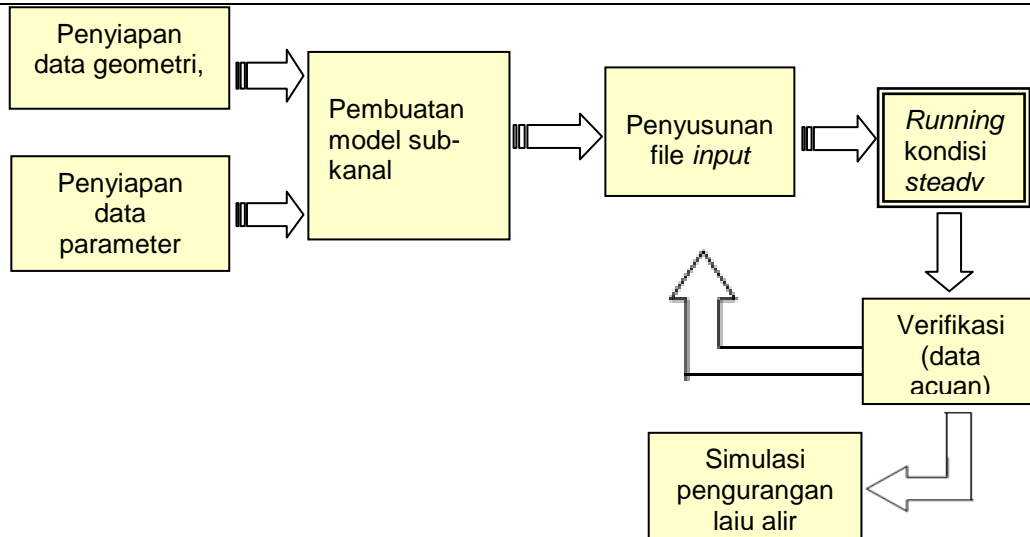


Gambar 2. Skematika nodalisasi volume kontrol massa, energi dan momentum

TATA KERJA

Sebagai ilustrasi sistematika, maka langkah kegiatan untuk evaluasi desain termal bundel elemen bakar AP-1000 menggunakan program RELAP5 dapat diberikan seperti Gambar 3. Terlihat pada gambar terdapat 4

langkah pekerjaan yaitu penyiapan data geometri dan parameter operasi, pembuatan model sub-kanal, penyusunan file *input*, *running*.

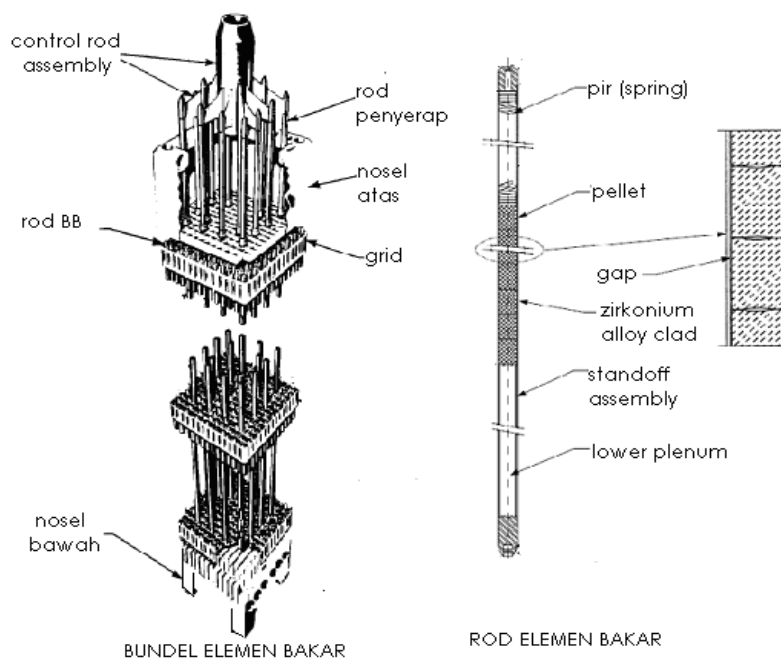


Gambar 3. Sistematika alur tata kerja pemodelan

BUNDEL ELEMEN BAKAR AP-1000

Bundel elemen bakar (EB) AP-1000 terdiri dari 264 *fuel rods* dalam rangkaian 17x17 *square array*. Bagian tengah EB memiliki *guide thimble* yang menjaga integritas kelengkapan instrumentasi untuk monitoring temperatur air dan fluks neutron di dalam teras. *Guide thimbles* dihubungkan dengan nosel atas dan bawah EB dan didukung dengan struktur penyangga untuk *fuel grids*. Setiap *fuel rod* terdapat per (*spring*)

untuk menahan *pellet* berada pada tempatnya sementara itu juga diberi ruang di dalam *rod* untuk ekspansi volume karena deformasi karena panas, radiasi neutron, dan dampak produk fisi gas. Bundel EB pada AP-1000, mempunyai panjang aktif 4,267 m dan *grid* pencampur aliran (*flow mixing grids*). Gambar 1 menunjukkan bundel elemen bakar dan *rod* AP-1000 dan Tabel 1 adalah data desain spesifikasinya^[7].



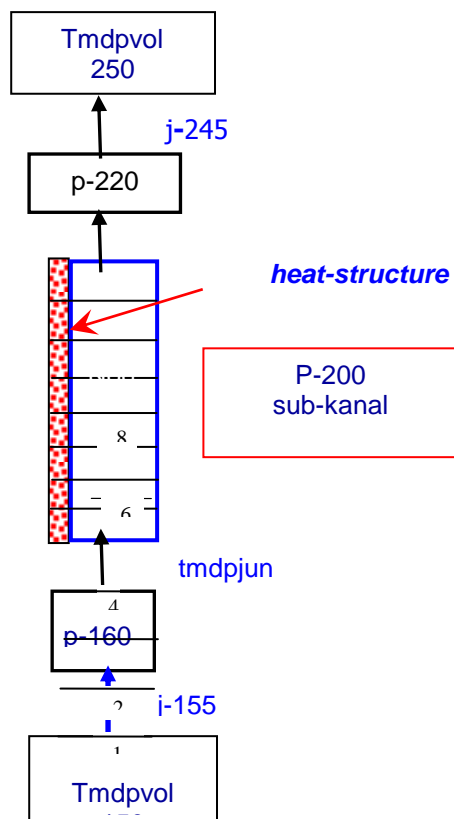
Gambar 1. Rod dan bundel elemen bakar^[7].

Tabel 1. Data desain AP-1000 [4].

No.	Parameter	Data desain
1.	Panjang aktif bahan bakar (m)	4,2672
2.	Diameter <i>rod</i> (m)	0,0095
3.	Diameter ekivalen sub-kanal (m)	0,011179
4.	<i>Rod pitch</i> (m)	0,01260
5.	Plenum atas (m)	0,164465
6.	<i>Flow area</i> sub-kanal (m ²)	0,0000878
7.	<i>Stand-off assembly</i> (m)	0,143129
8.	Kecepatan efektif pendingin (m/s)	4,85
9.	Temperatur <i>inlet</i> pendingin (K)	552,44
10.	Temperatur <i>outlet</i> pendingin (K)	629,64
11.	Temperatur <i>outlet</i> pendingin dari teras (K)	633,84
12.	Laju aliran massa pendingin (kg/s)	0,27961
13.	<i>Pressure drop</i> (Pa)	271429
14.	<i>Heat flux</i> rata-rata (W/m ²)	628710

Pada analisis termohidrolika sub-kanal elemen bakar, maka dalam pendekatan model pembangkitan kalor dari *rod* bahan bakar dipakai model struktur kalor dan penyerapan kalor oleh model volume pendingin. Model pendingin sub-kanal dialirkan secara *up-flow*

menggunakan model *time-dependent-junction* (tmdpjun). Gambar 5 menunjukkan pemodelan sub-kanal yang diaplikasikan pada RELAP5. Model ini terdiri dari 1 *heat-structure*, 1 volume sub-kanal aksial, dan 2 *time dependent volume* yang merepresentasikan kondisi plenum.

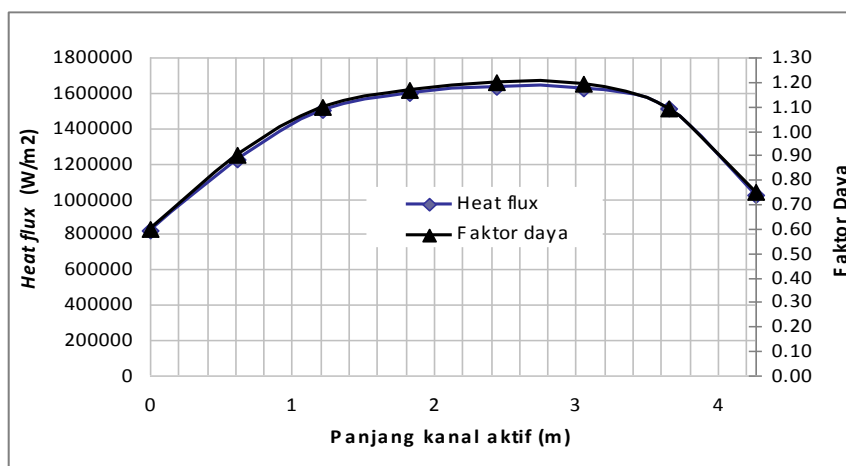


Gambar 5. Nodalisasi sub-kanal pada RELAP 5

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 6. menunjukkan distribusi *heat flux* dan faktor daya aksial sebagai fungsi panjang kanal elemen bakar. Panjang kanal aktif bahan bakar AP-1000 MWe adalah 4,267 m. Aliran pendingin di teras reaktor berlangsung

dari bawah ke atas. Angka 0,0 m pada panjang kanal bahan bakar menunjukkan posisi terbawah dan posisi tertinggi di ujung kanal 4,267 m.

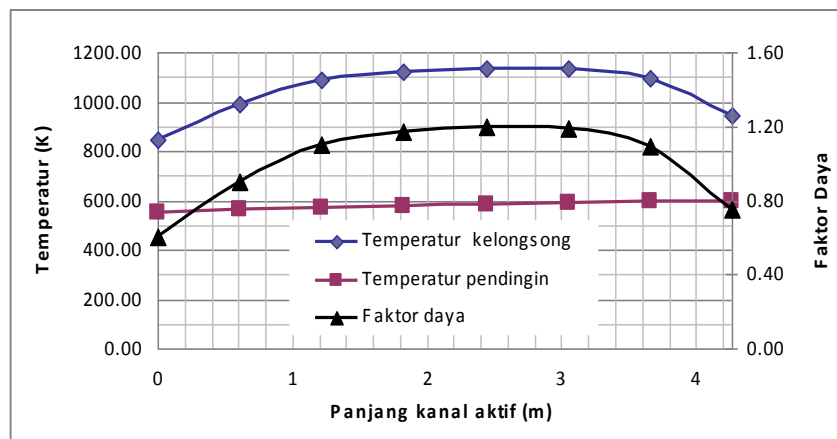


Gambar 6. Distribusi faktor daya aksial dan *heat flux* fungsi panjang kanal bahan bakar AP 1000 MWe.

Distribusi faktor daya aksial sepanjang kanal bahan bakar tampak mengikuti fungsi Cosinus A, hal ini sesuai dengan distribusi aksial fluks neutron, demikian pula sesuai dengan pembangkitan panas yang terjadi pada bahan bakar arah aksial. Pola faktor daya ini diperoleh dari kondisi desain dengan nilai tertinggi dari faktor daya ditentukan yaitu sebesar 1,2. *Heat flux* yang diperoleh dari perhitungan menunjukkan kecenderungan mengikuti pola distribusi faktor daya sepanjang kanal bahan bakar arah aksial, hal ini juga menunjukkan bahwa telah sesuai

antara faktor daya dan pembangkitan panas pada bahan bakar sepanjang kanal bahan bakar. Nilai tertinggi *heat flux* terjadi pada faktor daya tertinggi yaitu 1636000 W/m^2 , sedangkan nilai *heat flux* tertinggi dari data desain AP-1000 kondisi desain adalah 1630000 W/m^2 . Jadi perbedaan nilai *heat flux* tertinggi adalah sekitar 0,06 %, perbedaan ini relatif kecil.

Gambar 7 menunjukkan distribusi temperatur kelongsong, temperatur pendingin dan faktor daya sebagai fungsi panjang kanal untuk AP-1000.



Gambar 7. Kurva temperatur kelongsong, pendingin dan faktor daya sebagai fungsi panjang kanal

Distribusi temperatur kelongsong dan temperatur pendingin dari RELAP5 menunjukkan distribusi temperatur kelongsong sepanjang kanal bahan bakar telah mengikuti pola faktor daya, dengan demikian, sudah sesuai dengan pola pembangkitan panasnya. Berbeda halnya dengan distribusi temperatur pendingin sepanjang kanal bahan bakar. Temperatur pendingin semakin naik dengan bertambahnya panjang kanal bahan bakar mengikuti arah aliran pendingin. Hal ini karena adanya akumulasi panas dari tiap node bahan bakar pada pendingin. Temperatur pendingin masuk kanal bahan bakar kondisi desain untuk AP-1000 adalah

553,4 K. Nilai temperatur ini digunakan sebagai *input* program. Temperatur keluar di ujung kanal bahan bakar diperoleh sebesar 596,48 K. Kondisi desain temperatur keluar PWR 1000 adalah 597,81 K. Perbedaan antara hasil perhitungan dan kondisi desain untuk temperatur keluar pendingin lebih rendah 0,22 %. Nilai perbedaan ini tidak cukup signifikan, sehingga dapat dikatakan hasil ini menunjukkan kesesuaian dengan kondisi desain.

Hasil perhitungan termohidraulika sub-kanal elemen bakar AP-1000 menggunakan paket RELAP 5 yang dapat diperoleh diantaranya adalah nilai turun tekanan (*pressure drop*). Hasil perhitungan diperoleh

nilai turun tekanan yaitu sebesar 263000 Pa, sedangkan kondisi desain adalah 271429 Pa, jadi terdapat perbedaan sebesar 3,10 %. Angka penurunan tekanan aliran yang lebih tinggi ini dapat disebabkan karena distribusi temperatur pendingin pada pemodelan lebih

rendah daripada data desain, namun perbedaan dianggap tidak cukup signifikan. Data selengkapnya hasil perhitungan kondisi *steady* yang dibandingkan dengan kondisi desain diberikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komparasi hasil pemodelan sub-kanal kondisi *steady*

No.	Parameter	Data desain	Hasil pemodelan	Perbedaan
1	Temperatur <i>inlet</i> pendingin (K)	553,44	553,44	0,00 %
2	Temperatur <i>outlet</i> pendingin (K)	597,81	596,48	0,17 %
3	Temperatur terendah kelongsong (K)	-	846,57	
4	Temperatur tertinggi kelongsong (K)	-	1021,16	
5	Laju aliran pendingin (kg/s)	0,30	0,30	0,00 %
7	<i>Pressure drop</i> (Pa)	271429	263000	3,10 %
8	<i>Heat flux</i> tertinggi (W/m ²)	1,635E+6	1,636E+6	0,06 %

Simulasi pengurangan laju alir pendingin pada sub-kanal elemen bakar AP-1000 disajikan pada Gambar 8 dan 9, di mana ditunjukkan kurva laju alir dan dampak pembangkitan fraksi *void* di tiap node aksial secara simultan sebagai fungsi waktu (detik). Laju alir nominal pada sub-kanal adalah 0,3000 kg/s. Nilai ini ketika digunakan sebagai input untuk perhitungan distribusi temperatur kelongsong, pendingin dan *heat flux* pada keluaran hasil simulasi oleh RELAP 5 juga menunjukkan nilai yang sama.

Simulasi dilakukan dengan pengurangan laju alir dari angka nominalnya. Data penurunan laju alir didasarkan pada data

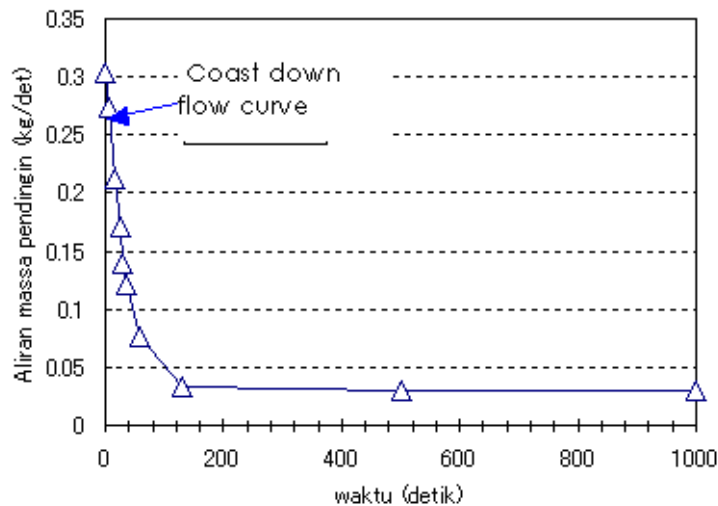
asumsi *coast down flow* pada simulasi program PCTTRAN [6.]. Hasilnya menunjukkan bahwa fraksi *void* pada *node-8* terbentuk setelah laju alir turun menjadi 0,1230 kg/s. Hal ini penting untuk dikaji karena berkaitan dengan kondisi kritis teras reaktor, tabulasi data tersebut di disajikan pada Tabel 3 dengan mengambil *node-1*, *node-2*, *node-4* *node-6* dan *node-8*. *Node-1* adalah posisi di mana pendingin masuk. Tampak bahwa setiap *node* memiliki kurva pembangkitan *void* yang berbeda, pada *node-1* terjadi pembangkitan *void* setelah laju alir pada 0,0155 kg/s.

Tabel 3. Fraksi *void* sebagai fungsi pengurangan laju alir pendingin

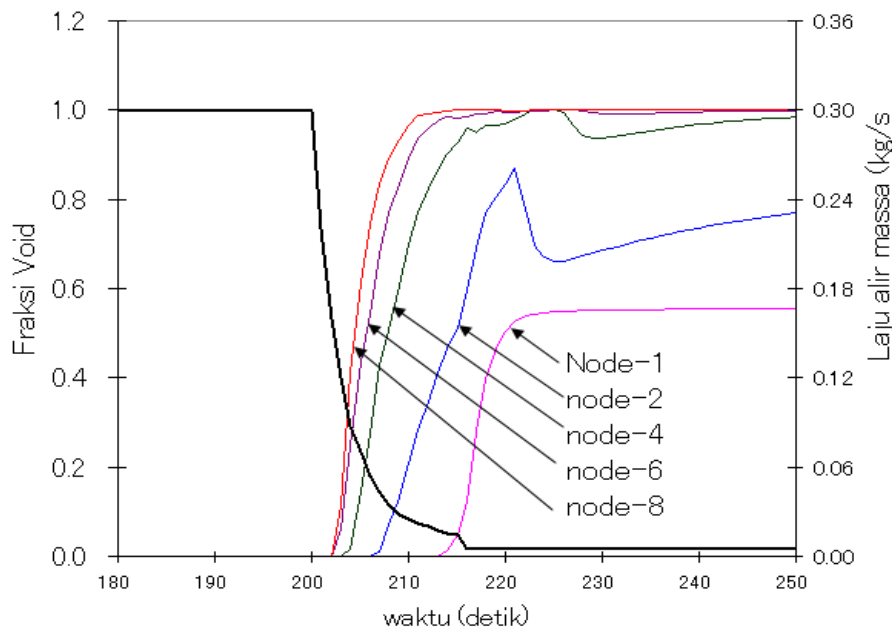
Laju alir kg/s)	Node 200-1	Node 200-2	Node 200-4	Node 200-6	Node 200-8
0.2990	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.2200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1600	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.1200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0613	0.1128
0.0880	0.0000	0.0000	0.0149	0.2476	0.4096
0.0700	0.0000	0.0000	0.1450	0.4365	0.6124
0.0540	0.0000	0.0000	0.2758	0.5421	0.7432
0.0430	0.0000	0.0089	0.4276	0.6780	0.8344
0.0350	0.0000	0.0701	0.5076	0.7704	0.8927
0.0280	0.0000	0.1319	0.6053	0.8351	0.9345
0.0246	0.0000	0.2077	0.6994	0.8924	0.9663
0.0220	0.0000	0.2826	0.7686	0.9372	0.9877
0.0199	0.0000	0.3480	0.8241	0.9590	0.9929
0.0170	0.0000	0.4103	0.8624	0.9757	0.9951
0.0150	0.0121	0.4665	0.9006	0.9851	0.9977
0.0140	0.0491	0.5117	0.9274	0.9826	0.9998
0.0050	0.1221	0.5979	0.9609	0.9863	0.9999

Meskipun simulasi ini tidak diverifikasi terhadap data desain mengingat tidak cukup data untuk membandingkannya, namun hasil investigasi secara umum, kondisi ini cukup memuaskan di mana awal pembangkitan *void*

terjadi pada bagian posisi pendingin keluar sub-kanal, pada posisi ini panas terakumulasi yang mengakibatkan pembangkitan *void* lebih awal.



Gambar 8. Penurunan aliran massa pendingin fungsi waktu



Gambar 9. Fraksi void pada tiap node aksial sebagai fungsi waktu

SIMPULAN

Hasil perhitungan termohidraulika sub-kanal elemen bakar AP-1000 MWe menggunakan paket program RELAP5 yang meliputi distribusi temperatur kelongsong, pendingin dan *heat flux* sepanjang kanal aktif, berhasil dilakukan untuk validasi model sub-kanal pada RELAP5 dan tidak terdapat perbedaan yang signifikan terhadap data

desain yang diacu. Hasil simulasi yang dilakukan dengan pengurangan laju alir menunjukkan bahwa fraksi void terbentuk setelah laju alir turun menjadi 0,1230 kg/s. Hal ini penting untuk dikaji karena berkaitan dengan kondisi kritis teras reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

1. SUROSO, DIBYO S., (2010), Analisis Efisiensi Siklus Rankine Pada Untai Termodinamika PWR 1000 MWe, Prosiding Seminar Pengembangan Energi Nuklir 2010, PPEN BATAN, Jakarta.
2. ANONIM, (1995), RELAP5 Code Development Team, RELAP5/MOD3. Code Manual User Guide and Input Requirements, NUREG/CR-5535-V2. Idaho National Engineering Laboratory, Washington DC.
3. KUNDO, MISAYA, (2008), Practical Work of Relap5 Analysis, IAEA, NSRA.
4. RALPH,A.NELSON et al., (1996), Phenomogical Thermal-hydraulic model of Hot Rod bundel experiencing and optimization methodology for closure development, Reflood completion report, DOE, USA.
5. KAZIMI, M.S and TODREAS, N.E., (1991), Nuclear System I, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
6. <http://www.ukap1000application.com>. (2010)
7. SUKMANTO D. et al, (2009), Pengembangan model Bagian uji QUEEN-II menggunakan RELAP5, Laporan akhir Block-Grant, PTRKN-BATAN.